

# 15MnVN钢疲劳裂纹开始扩展规律的研究

中国科学院力学研究所

邓蓉英 田 萍 马运福

## 一、 引 言

门槛值 (Threshold)  $\Delta K_{th}$  和裂纹扩展速率  $da/dN$  是反映带裂纹构件抗疲劳性能的重要指标, 是工程设计选材和安全性分析必不可少的参数。特别是在载荷谱的分析中参数  $\Delta K_{th}$  起着重要作用。门槛值  $\Delta K_{th}$  定义为:

$$\Delta K_{th} = \Delta K \Big|_{da/dN \rightarrow 0} \quad (1)$$

式 (1) 中  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$

大量实验研究如果表明: 在空气介质中和平面应变条件下, 对于给定的材料,  $\Delta K_{th}$  受循环应力比  $R$  ( $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ )、加载频率  $f$  和温度等因素的影响, 但以  $R$  对  $\Delta K_{th}$  的影响最为明显。本文实验测定了 15MnVN 钢  $R=0.1 \sim 0.9$  范围的  $\Delta K_{th}$ 。同时研究了  $R$  对  $\Delta K_{th}$  的影响规律, 并以有限厚度板上的表面裂纹为例, 通过实验测得的  $\Delta K_{th}$  值计算了裂纹开始扩展时的循环应力幅  $\Delta \sigma$  ( $\Delta \sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ ) 与下临界裂纹尺寸  $a_0$  的关系, 以及  $R$  对它的影响。

## 二、 实 验 方 法

实验材料采用了 15MnVN 钢, 其化学成份和机械性能如表 (1)。

表 (1)

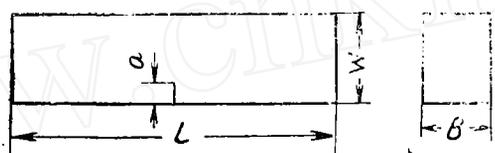
化 学 成 份 %						
C	Si	Mn	P	S	V	N
0.18	0.31	1.61	0.018	0.025	0.11	0.022
机 械 性 能						
$\sigma_b$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\sigma_s$ 公斤/毫米 <sup>2</sup>	$\delta_5$ %	$\alpha_k$ (40°C) 公斤-米/厘米 <sup>2</sup>	$\alpha_k'$ (时效) 公斤-米/厘米 <sup>2</sup>	冷 弯 180°, d = 30	
60.0	45.0	27.5	5.9, 5.9, 6.0	5.5, 5.5	完好	
热 处 理		正火状态 (950°C)				
显 微 组 织		铁素体和少量的珠光体呈带状				

\* 下临界裂纹尺寸 (本文以  $a_0$  表示), 指在一定水平的循环载荷作用下, 裂纹开始扩展所需裂纹尺寸。它和裂纹的临界尺寸  $a_c$  不同,  $a_c$  是指裂纹失稳扩展发生脆性断裂的裂纹尺寸。

从式(1)可知门槛值  $\Delta K_{th}$  为裂纹扩展速率等于零时的最大应力强度因子范围。因此准确测定不易。但大量实验结果表明：在  $\log da/dN - \log \Delta K$  曲线上，当  $da/dN$  低于  $10^{-8}$  毫米/次时， $\Delta K$  值较小的变化引起裂纹扩展速率很大的变化，甚至许多材料  $da/dN$  随  $\Delta K$  的减少而铅直向下。所以一般在平面应变条件和空气介质中，把  $da/dN$  在  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  毫米/次范围内所对应的  $\Delta K$  值定为材料的  $\Delta K_{th}$  [1]。本实验把  $da/dN \leq 0.2 \times 10^{-8}$  毫米/次所对应的  $\Delta K$  值定为  $\Delta K_{th}$  值。

为了克服引发疲劳裂纹时所用的高载荷在裂纹尖端形成的塑性区对裂纹扩展的阻碍作用，我们在实验中采用了  $\Delta K$  依次递减的方法测定  $\Delta K_{th}$  值。实验是在 2 吨 Amsler 和 6 吨 Schenck 疲劳试验机上采用三点弯曲加载方式进行的，加载频率分别为 125 HZ 和 33.3 HZ。用 30 倍读数显微镜测量裂纹长度。

三点弯曲试样是在厚度为 56 毫米的钢板上切取，试样的形程和尺寸如图 1。



W	B	L	(毫米)
30	20	160	
54	54	530	

图 1 三点弯曲试样尺寸

应力强度因子的计算式 [2、3] 为：

$$S/W = 4.0 \quad K_I = \frac{PY}{BW^{3/2}} \quad (2)$$

$$S/W = 8.0 \quad K_I = \frac{12P(\pi a)^{1/2} Y}{BW(1-a/W)^{3/2}} \quad (3)$$

式中：P—载荷；Y—形状因子，是  $a/w$  的多项式。

### 三、实验结果与分析

在循环应力比  $R = 0.1 \sim 0.9$  和相对裂纹尺寸  $a/w = 0.25 \sim 0.30$  范围内测定了  $\Delta K_{th}$  值。实验结果绘于图 2。其结果表明，循环应力比  $R$  对  $\Delta K_{th}$  值的影响表现为两种情况：(1) 在低循环应力比范围， $\Delta K_{th}$  值明显地随  $R$  的增加而下降， $R$  和  $\Delta K_{th}$  之间呈线性关系；(2)  $R$  不断增加达到一定值以后， $\Delta K_{th}$  几乎不再随  $R$  变化而保持一恒定值如图 2(a) 所示。

在门槛值  $\Delta K_{th}$  所对应的最大应力强度因子  $K_{max}$  和最小应力强度因子  $K_{min}$  与循环应力比  $R$  的关系曲线中， $K_{min}$  在低  $R$  范围内，随着  $R$  的不断加而线性地增加，然而  $K_{max}$  却保持一恒定值。该恒定值由实验确定为 32.8 公斤/毫米<sup>3/2</sup>。

实验更进一步得到，当裂纹在  $\Delta K_{th}$  附近扩展时，在  $R < 0.6$  的范围  $\Delta K_{th}$  与  $R$  的关系

满足方程 (4)。

$$\begin{aligned} \Delta K_{th} &= K_{max} - K_{min} = K_{max} (1 - R) \\ \Delta K_{th} &= 32.8 (1 - R) \end{aligned} \quad (4)$$

而  $R \geq 0.6$  范围, 则满足方程 (5)

$$\Delta K_{th} = 13.20 \quad (5)$$

我们把  $R=0.6$  时的循环应力比记为  $R_{c1}$ , 它是裂纹尖端交变应力强度因子中最小应力强度因子  $K_{min}$  等于材料闭合应力强度因子 (其意义见后) 时的循环应力比。从图 2 (b) 中, 明显地看到当  $R < R_{c1}$  时  $K_{max}$  和  $K_{min}$  随  $R$  的增加两者的变化规律是不同的。而当  $R \geq R_{c1}$  时,  $K_{max}$  和  $K_{min}$  随着  $R$  的增加急剧上升, 但两者之差却保持常数。实验结果更清楚表明, 在  $R < R_{c1}$  范围, 无论  $K_{min}$  如何变化, 要使裂纹在  $\Delta K_{th}$  开始扩展所需要的  $K_{max}$  是相同的。这就说明, 只要裂纹尖端最大应力强度因子达到某一值 (前面已提到此值为 32.8 公斤/毫米<sup>3/2</sup>), 而  $K_{min}$  的变化对裂纹开始扩展没有影响。R. A. Schmidt 和 P. C. Paris<sup>[4]</sup> 曾指出: “由于金属在凝固过程中保留在晶粒内部的一种微观残余应力, 在裂纹尖端相应存在着一定水平的闭合应力强度因子  $K_{c1}$  使裂纹尖端处于闭合状态”。如果外载等于零, 或裂纹尖端的应力强度因子  $K$  小于  $K_{c1}$ , 裂纹不扩展。只有  $K > K_{c1}$ , 裂纹尖端才张开并扩展。在循环加载下, 裂纹尖端受  $K_{min} - K_{c1} - K_{max} - K_{min}$  反复交变作用。这样, 裂纹尖端的应力强度有以下三种可能情况: (1) 在  $K_{min} - K_{max} - K_{min}$  的全部循环中, 瞬时  $K$  都小于  $K_{c1}$ , 裂纹虽受载荷的交变作用也不扩展; (2) 材料的  $K_{c1}$  值介于  $K_{min}$  与  $K_{max}$  之间, 在整个循环加载过程中, 只有大于  $K_{c1}$  的加载才对裂纹扩展起作用; (3) 循环加载中的  $K$  皆大于  $K_{c1}$ , 裂纹在整个循环中都能扩展。实验中  $R < R_{c1}$  和  $R > R_{c1}$  的加载条件分别相应于 (2) 和 (3) 的情况。这就充分说明了, 为什么在实验中观察到在图 2 (b) 斜格影线区域内改变  $K_{min}$  对裂纹开始扩展无影响。这是由于裂纹在斜格影线区的应力状态下是闭合的缘故。对裂纹开始扩展起作用的是  $K_{max} - K_{c1}$  这部分载荷, 并

$$\Delta K' = K_{max} - K_{c1} = \text{常数} \quad (6)$$

从图 2 (b) 中, 也可看出  $R$  增加对裂纹开始扩展起作用的载荷比 (即  $\frac{K_{max} - K_{c1}}{K_{max} - K_{min}}$ ) 也增加, 所以在  $R < R_{c1}$  范围, 随  $R$  的增加而  $\Delta K_{th}$  值下降。显然  $K_{c1}$  是一个材料常数。

在  $R > R_{c1}$  范围, 实验结果表明  $\Delta K_{th}$  不随  $R$  变化而保持一恒定值, 这是因为在此范围

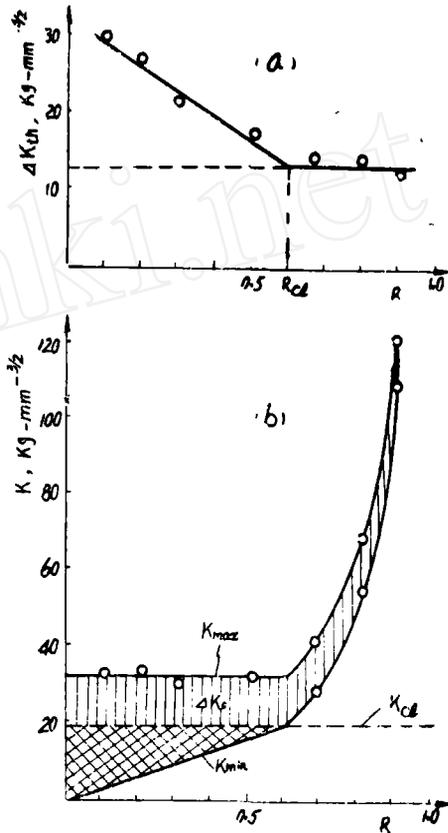


图 2 应力强度因子  $K$  和循环应力比  $R$  的关系  
(a)  $\Delta K_{th}$  与  $R$  的关系  
(b)  $K_{max}$ 、 $K_{min}$  与  $R$  的关系

$K_{min}$  都超过  $K_{c1}$ , 裂纹尖端在每一个  $R$  的循环加载中都是张开的, 全部循环载荷都对裂纹扩展起作用 (即上述第三种情况)。所以当  $R$  不断增加, 在提高平均应力强度因子  $K_m$  ( $K_m = \frac{1}{2}(K_{max} + K_{min})$ ) 的过程中, 只有不断提高相应的  $K_{max}$  和  $K_{min}$  (如图3), 并保持  $K_{max} - K_{min}$  之差一定, 来满足  $\Delta K_{th}$  为一定值。这个事实说明, 要使裂纹开始扩展, 必须使裂纹尖端应力强度因子围范  $\Delta K$  达到一定水平  $\Delta K_0$ 。根据以上的分析有:

$$K_{c1} = K_{max} \times R_{c1}$$

$$= 32.8 \times 0.6 = 19.68 \quad \text{公斤/毫米}^{3/2}$$

则  $\Delta K' = 32.8 - 19.68 = 13.12 \quad \text{公斤/毫米}^{3/2}$

$$\therefore \Delta K' \approx \Delta K_{th} (R > R_{c1}) = \Delta K_0 \quad (7)$$

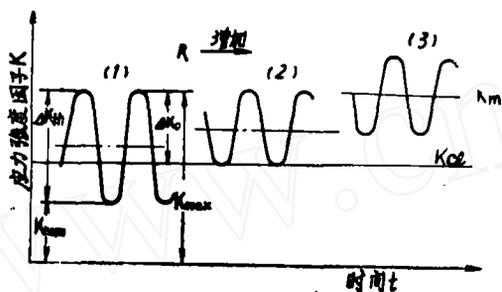


图3 几种应力强度因子间的关系

- (1)  $K_{c1} > K_{min}$      $R < R_{c1}$
- (2)  $K_{c1} = K_{min}$      $R = R_{c1}$
- (3)  $K_{c1} < K_{min}$      $R > R_{c1}$

从式(7)说明, 循环应力比在0.1到0.9的范围, 对裂纹开始扩展真正起作用的是  $\Delta K_0$ 。对给定材料,  $\Delta K_0$  是一个固定值, 是不受加载条件  $R$  影响的常数。但是在不同的循环应力比范围, 对裂纹开始扩展起控制作用的参数却不相同。在  $R < R_{c1}$  范围是裂纹尖端的最大应力强度因子  $K_{max}$ , 而在  $R > R_{c1}$  范围起控制作用的却是裂纹尖端的应力强度因子围范  $\Delta K_0$ 。

从以上分析讨论可知:

$$\Delta K_{th} (R < R_{c1}) = (K_{max} (R < R_{c1})) (1 - R) \quad (8)$$

$$K_{max} (R < R_{c1}) = K_{c1} + \Delta K_0 = K_{c1} + \Delta K_{th} (R > R_{c1})$$

$$\therefore \Delta K_{th} (R < R_{c1}) = (K_{c1} + \Delta K_{th} (R > R_{c1})) (1 - R) \quad (9)$$

由(9)式清楚看到, 如果实验得到高循环应力比范围内 ( $R > R_{c1}$ ) 任意一个  $R$  值的  $\Delta K_{th}$  (即得  $\Delta K_0$ ) 和低循环应力比范围内 ( $R < R_{c1}$ ) 任意一个  $R$  值的  $\Delta K_{th}$  (即可得相应的  $K_{max}$ ) 的数据, 就可以计算出材料的  $K_{c1}$  和  $R_{c1}$ 。

$$K_{c1} (\text{计}) = K_{max} (R < R_{c1}) - \Delta K_{th} (R > R_{c1})$$

$$R_{c1} (\text{计}) = \frac{K_{c1} (\text{计})}{K_{max} (R < R_{c1})} \quad (10)$$

有了  $K_{max} (R < R_{c1})$ 、 $\Delta K_{th} (R > R_{c1})$  (即  $\Delta K_0$ ) 和  $R_{c1}$  三个参数就可以写出如(4)(5)两个关系式, 因而材料的  $\Delta K_{th}$  与  $R$  之间关系就唯一地确定了。从而知道任意  $R$  值的  $\Delta K_{th}$  值。使  $\Delta K_{th}$  的繁重测试工作大大简化为只测两个  $R$  值下的  $\Delta K_{th}$  值。这就使我们更加深刻地了解到  $K_{max} (R < R_{c1})$  和  $\Delta K_0$  是对裂纹开始扩展起作用的两个主要参量。

下面我们以有限厚度板表面裂纹为例,采用 Irwin [5、6] 对平椭圆裂纹的分析结果和我们实验中得到的  $R=0.1, 0.3, 0.5$  和  $0.7$  的一组  $\Delta K_{Ih}$  值,分别计算在均匀拉伸循环载荷下裂纹开始扩展时循环应力范围  $\Delta\sigma$  与下临界裂纹尺寸  $a_0$  的关系。Irwin 结果为:

$$K_I = \frac{\sigma (\pi a)^{\frac{1}{2}}}{\Phi} \left( \sin^2 \phi + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \phi \right)^{1/4} \quad (11)$$

当  $\phi = \frac{\pi}{2}$  时,  $K_I$  最大。由于裂纹在  $\Delta K_{Ih}$  附近开始扩展,裂纹前缘的塑性区很小,因而只考虑有限厚度板前、后表面的影响,对裂纹在深度方向(即平椭圆短轴方向)进行了计算。

$$a_0 = \left( \frac{\Delta K_{Ih} \Phi}{M_k \Delta \sigma} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (12)$$

$\Phi$  和  $M_k$  分别为第二类椭圆积分和弹性校正系数,从文献 [7] 中曲线查得。

$\Delta\sigma$  与  $a_0$  关系的计算结果绘于图 4。计算结果表明:循环应力比、应力范围和椭圆度  $a/c$  对裂纹开始扩展的下临界裂纹尺寸  $a_0$  都有明显的影响。在我们的计算条件(椭圆度  $a/c = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  和  $1.0$ ;  $\Delta\sigma = 9 \sim 108, 7 \sim 84, 5 \sim 60$  和  $3 \sim 36$  公斤/毫米<sup>2</sup> 的范围)下,裂纹开始扩展的下临界裂纹尺寸  $a_0$  的变化从  $0.017 \sim 14.9$  毫米。图 4 中的计算曲线清楚表明在低  $\Delta\sigma$  范围,下临界裂纹尺寸  $a_0$  受  $\Delta\sigma$  的影响较大。 $\Delta\sigma$  增加引起  $a_0$  急剧下降,这样  $\Delta\sigma$  值小的变化就会引起  $a_0$  较大变化。相反在高的  $\Delta\sigma$  范围,  $\Delta\sigma$  的变化对  $a_0$  影响很小,但是  $a_0$  的较小差异会使带裂纹构件承载能力发生较大的变化。

在相同水平的  $\Delta\sigma$  条件下,  $R$  不同(即  $\Delta K_{Ih}$  值不同),下临界裂纹尺寸  $a_0$  也不同。 $R$  值越大,  $a_0$  越小。表面裂纹的  $a/c$  越小,  $a_0$  也越小。裂纹的下临界尺寸小,说明带裂纹构件允许存在的初始裂纹尺寸要小,否则裂纹在循环载荷作用下就会扩展。

## 四、结 论

1.  $R$  是影响 15MnVN 钢  $\Delta K_{Ih}$  值的主要因素,  $\Delta K_{Ih}$  与  $R$  的关系为:

$$R < R_{c1} \quad \Delta K_{Ih} = 32.8 (1 - R)$$

$$R \geq R_{c1} \quad \Delta K_{Ih} = 13.2$$

$$R_{c1} = 0.6$$

2.  $R < R_{c1}$  时,对裂纹开始扩展起控制作用的参数是  $K_{max}$ ;  $R \geq R_{c1}$  时,起控制作用的则是  $\Delta K_0$ 。

3.  $K_{max} (R < R_{c1}) - K_{c1} = \Delta K_{Ih} (R > R_{c1}) = \Delta K_0$ , 在  $R = 0.1 \sim 0.9$  范围,  $\Delta K_0$  是一恒定值,该值大小只与材料有关,不受  $R$  大小的影响。

4. 在相同  $\Delta\sigma$  水平下,  $R$  和  $a/c$  越大,裂纹开始扩展的下临界裂纹尺寸  $a_0$  越小。

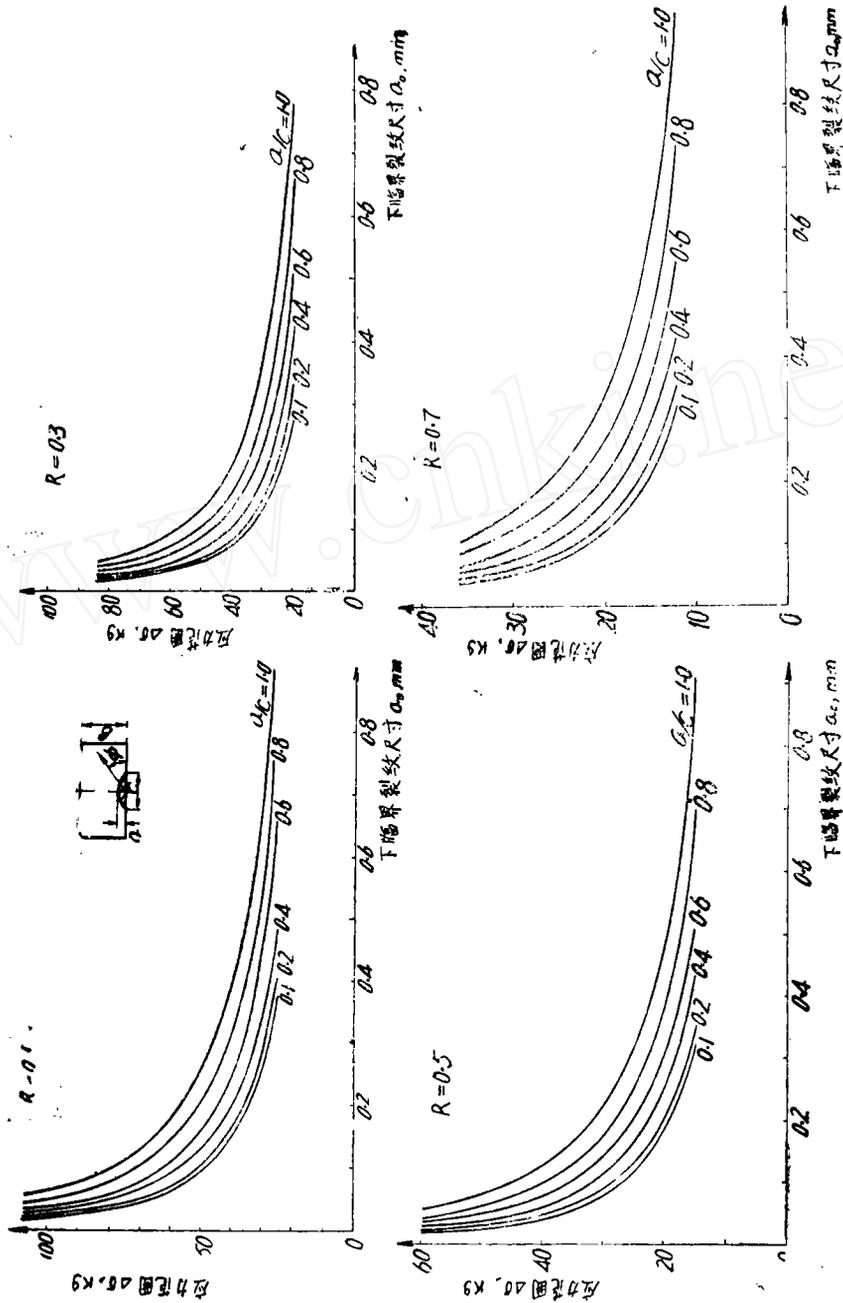


图4 有限厚度板表面裂纹在均匀循环拉伸载荷下 $\Delta\sigma$ - $a_0$ 的关系

### 参 考 文 献

- [1] Donakue R.J., Melclark H., Atanna P., Kumble R., Mcerily A.J., *Inter. J. of Fract. Mech.* 8, 2. (1972).
- [2] 冶金部钢铁研究院断裂力学组, 应力强度因子资料, 1975.
- [3] George C.Sih., *Methods of Analysis and Solution of Crack Problems, Mech. of Fract.* Vol. 1.
- [4] R.A.Schmidt and P.C. Pairs, *ASTM-STP437*, 1972.
- [5] G.R.Irwin, *J. of Appl. mech.*, ASME 29 (1965) PP.651.
- [6] A.E.Green and Sneddon, *Proc. of Cambridge phil .Soc.* 46 (1950) , pp159
- [7] D. Brock, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, 1974.